

热处理对 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金组织和耐蚀性能的影响

马旭^{1,2} 李全安^{1,2,3} 井晓天¹

1. 西安理工大学材料科学与工程学院 西安 710048;

2. 河南科技大学材料科学与工程学院 洛阳 471023;

3. 河南科技大学 有色金属共性技术河南省协同创新中心 洛阳 471023

摘要:通过 OM, XRD, TEM 和 SEM 等手段研究了热处理前后 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr (质量分数, %) 合金的显微组织形貌, 并在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中进行了 0~96 h 的失重腐蚀实验。结果表明: 合金铸态组织由 α -Mg 基体和粗大的枝晶 β 相组成, 热处理后, 合金中的 β 相经溶解再析出过程, 由断续网状转变为方块颗粒状; 在 3.5% NaCl 溶液中, 经热处理后, 合金的耐蚀性能明显提高, 其平均腐蚀速率由铸态时的 $0.74 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 降低到固溶态时的 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和时效态时的 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 且腐蚀产物以 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 为主。

关键词:热处理 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金 显微组织 耐蚀性能

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537(2016)02-0143-07

Influence of Heat Treatment on Microstructure and Corrosion Resistance of Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr Alloy

MA Xu^{1,2}, LI Quan'an^{1,2,3}, JING Xiaotian¹

1. College of Materials Science and Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Materials Science and Technology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

3. Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China

Abstract: The microstructure of Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr (mass fraction, %) alloy after solid solution and aging treatment were characterized by means of OM, XRD, TEM and SEM. The average corrosion rate in 3.5% (mass fraction) NaCl solution was measured for 0~96 h. The results show that the microstructure of the as-cast alloy is composed of α -Mg matrix and coarse dendritic crystal β phase. After heat treatment, the β phase has experienced a course of dissolution and then precipitation, while the discontinued net-like β -phase transformed into cuboid-shaped particles due to the solution and aging treatment. The heat treatments are beneficial to the corrosion resistant of the alloy in 3.5% NaCl solution, while its corrosion rate was $0.74 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ for the as-cast, $0.41 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ for the solid solution treated and $0.35 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ for the aging treated ones respectively. The corrosion products of the alloy is mainly composed of $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

定稿日期: 2015-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51171059) 和河南省基础与前沿技术研究计划项目 (102300410018) 资助

作者简介: 马旭, 男, 1976年生, 博士生

通讯作者: 李全安, E-mail: q-ali@163.com, 研究方向为耐热稀土镁合金

DOI: 10.11902/1005.4537.2015.040

Key words: heat treatment, Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy, microstructure, corrosion resistance

1 前言

镁合金是目前最轻的金属结构材料,被应用于汽车、航天航空和国防等领域,但是由于Mg的化学性质活泼,标准电极电位($V_{\text{NHE}}=-2.37\text{ V}$, NHE为标准氢电极)是用作结构材料的金属中最低的,容易失去电子而发生氧化反应,而且Mg的氧化膜致密性欠佳,对基体保护能力差,限制了其应用范围^[1-4]。稀土元素具有特殊的电子结构,可以净化合金熔体、细化合金组织、提高合金强度以及增强合金的耐蚀性能^[5,6]。稀土化合物的极化电阻比较大,腐蚀过程中可以在镁合金表面形成含有多种元素的氧化膜,几乎不溶于水,对基体起到很好的钝化保护作用,因此能降低镁合金的腐蚀速率^[7-10]。

研究者在对高性能镁合金的探索 and 开发中,往往通过热处理来改变镁合金的微观组织以提高其耐蚀性能,达到应用标准^[11]。Mg-Gd系合金固溶体有较多亚稳的溶解度间隙,经过T4和T6热处理可以改变 β 析出相的数量,从而提高合金的耐蚀性能。在Mg-Gd合金中加入稀土元素Nd,时效过程中析出的 Mg_{12}Nd 相硬度和熔点都很高,热稳定性好,能有效提高合金的强度和耐蚀性能^[12,13]。Mg-RE合金系中通常加入Zr,因为Zr是一种有效的晶粒细化剂,主要分布在晶界上,起牵引和钉扎晶界作用,阻碍位错移动和晶粒长大,从而提高镁合金的耐蚀性^[14-17]。

因此,本文设计了Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr(质量分数,%)实验合金,将铸态、固溶态及时效态合金分别浸泡在3.5%(质量分数)NaCl溶液中,采用腐蚀失重法计算合金的腐蚀速率。研究热处理后合金的组织变化对其腐蚀速率的影响及作用机理,为提高稀土镁合金耐蚀性能、扩大其应用范围提供理论及实验依据。

2 实验方法

实验所用材料为纯Mg(99.95%,质量分数)及中间合金Mg-30Gd, Mg-25Nd和Mg-25Zr,配料时考虑合金烧损率对各合金元素增配一定值,所有原材料在装炉前都要进行烘干。采用石墨坩埚在感应炉中进行熔炼,熔炼和浇注过程中,均采用1%(体积分数) $\text{SF}_6+99\%\text{CO}_2$ 混合气体进行保护。合金熔化后升温到710℃,搅拌合金熔体,确保合金元素混合均匀,保温20 min后,浇注于预热温度为250℃的金属型模具中。利用ICAP6300等离子体光谱仪分析合金成分,符合要求。将合金加工成 $\Phi 100\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 的毛坯试样,用MgO粉覆盖,在箱式炉中进行固溶

(525℃/6 h)、时效(225℃/12 h)处理。

金相腐蚀剂采用4%硝酸乙醇溶液,通过Olympus光学显微镜(OM),JSM-5610LV扫描电镜(SEM)、JEM-2100高分辨透射电子显微镜(HR-TEM)进行观察和分析显微组织。并用D8 Advance型X射线衍射仪(XRD)对合金进行物相分析。

采用静态失重法测试合金(铸态,固溶态和时效态)的腐蚀速率,腐蚀介质为3.5%NaCl溶液(pH值为7~7.5),实验温度为 $(25\pm 3)\text{ }^\circ\text{C}$,腐蚀时间为8, 16, 24, 48, 72和96 h。试样为 $\Phi 20\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 圆饼状,腐蚀前经金相砂纸逐级研磨,然后用丙酮和无水乙醇清洗。腐蚀后取出,用20%(质量分数) $\text{CrO}_3+1\%\text{AgNO}_3$ 混合溶液清除试样表面的腐蚀物,在万分之一电子天平上测量试样腐蚀前后的质量,计算腐蚀速率。

腐蚀速率计算公式为:

$$C = 365 \times 24 \times 1000(W_0 - W)/(\rho \times s \times t) \quad (1)$$

式中, C 为腐蚀速率($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); W_0 和 W 分别为腐蚀前后的质量(g); ρ 为合金密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); s 为试样面积(mm^2); t 为腐蚀时间(h)。

3 结果与讨论

3.1 合金的显微组织

图1为Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金热处理前后的显微组织。铸态合金组织由 $\alpha\text{-Mg}$ 基体和共晶相组成,共晶相主要是沿晶界断续呈网状分布的枝状 β 相和少量分布在晶内的颗粒状 β 相,存在着较严重的枝晶偏析现象,部分晶界被遮盖,晶界轮廓难以分辨。固溶态合金组织由 $\alpha\text{-Mg}$ 基体和少量沿着晶界分布的颗粒状或小块状未溶相组成,网状枝晶化合物已固溶于Mg基体,说明该结构的化合物在525℃条件下是不稳定的。时效态合金组织出现了大量细条状、颗粒状析出相分布在晶界和晶内,这是由于在固溶时效处理过程中, β 相的溶解后再析出,使得 β 相的形貌发生改变,随着 β 相的析出晶粒尺寸也随之长大。

图2为Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金组织的SEM像。铸态合金中,粗大的铸态枝晶,沿着晶界分布;固溶态合金中存在颗粒状未溶相,少数呈方块状分布在晶界上和晶界附近;时效态析出物中方块状颗粒明显增多,主要沿着晶界分布。合金经过热处理后,Mg₂Gd相在晶界附近再次析出,形态转变为方块状颗粒状,而 Mg_{12}Nd 相的析出方式没有改变,还是在晶界上形成的不规则颗粒状。这说明经固溶处理

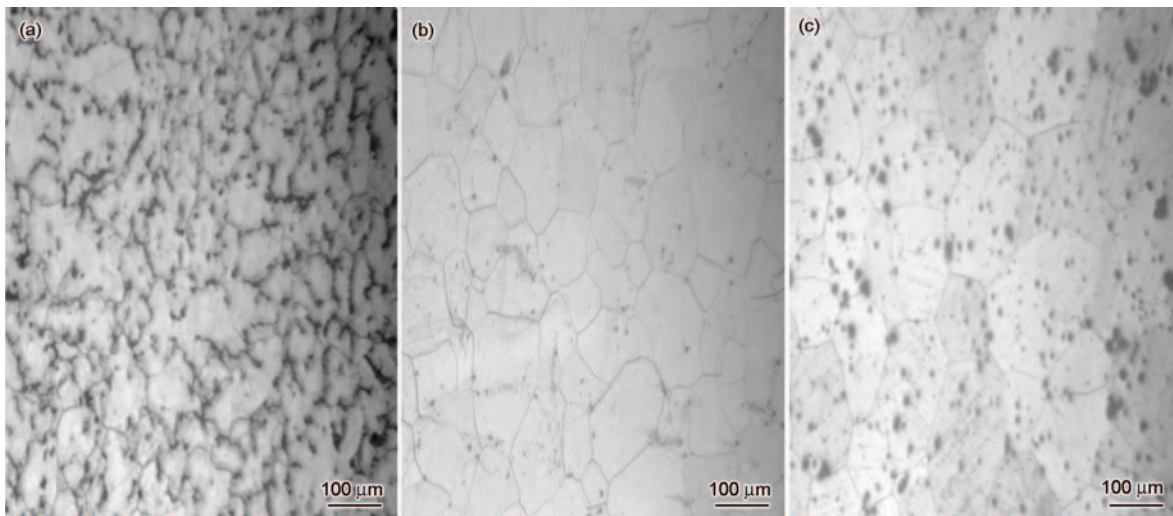


图1 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金热处理前后的显微组织

Fig.1 Microstructures of Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy before and after heat treatment: (a) as-cast, (b) solid solution state, (c) aging state

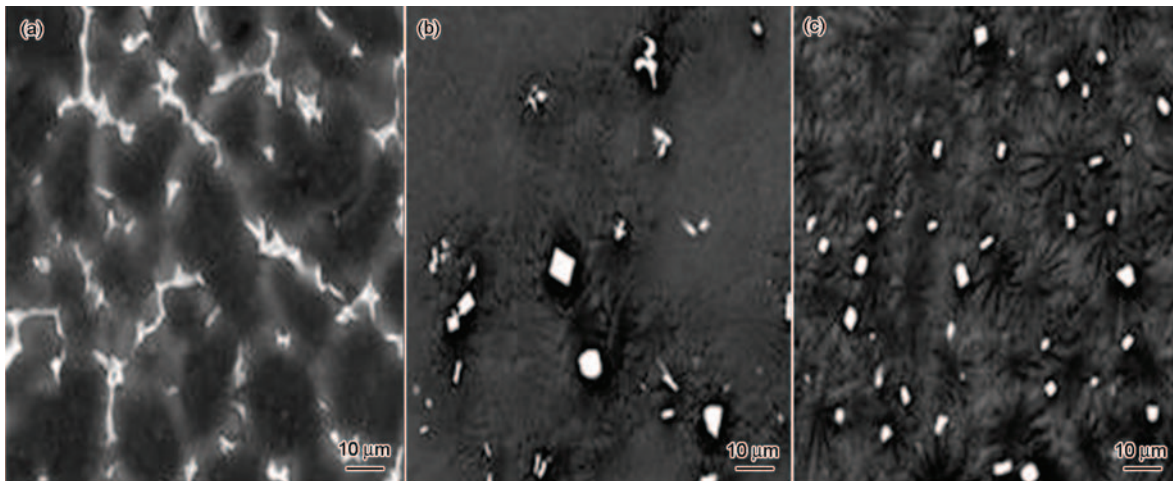


图2 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金热处理前后的SEM像

Fig.2 SEM images of Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy before and after heat treatment: (a) as-cast, (b) solid solution state, (c) aging state

后,溶解于Mg基体内的 β 相,在时效时重新析出的过程中,由于过饱和和Gd的脱溶方式的改变以及Gd扩散速率的增大,使得 β 相由铸态时的树枝状转变为热处理后的颗粒状。

图3为Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金组织的TEM明场像及选区电子衍射。图3a为合金铸态枝状共晶相的一部分,呈柱棒状,尺寸为微米级。在入射角为 $[49\bar{3}]_{\beta}$ 时,晶粒内 β 相呈枝状型态。图3b为固溶态的合金组织,绝大部分第二相(尤其是晶界相)已固溶于Mg基体中,且没有新相产生。未溶相呈颗粒状弥散分布在合金晶内与晶界。入射方向为 $[3\bar{3}0]_{\alpha}$ 的选区电子衍射谱中,颗粒状相主要为Mg和Gd的生成相,同时发现合金相内含有少量的Nd。经固溶处理后,Mg₅Gd和Mg₁₂Nd相已固溶于Mg基体内,而

Mg₅Gd和Mg₄₁Nd相转变温度较高,分别为642和542℃,因此在此固溶条件下难于发生转变。图3c为时效态合金组织,合金经过时效后,大量颗粒状及方块状的析出相弥散分布,尺寸为纳米级。纳米级析出相的脱溶析出有效强化合金。入射方向为 $[\bar{1}010]_{\alpha}$ 的选区电子衍射谱中出现的小斑点在 $1/4\{0\bar{1}\bar{1}1\}_{\alpha}$, $1/2\{0\bar{1}\bar{1}1\}_{\alpha}$ 和 $3/4\{0\bar{1}\bar{1}1\}_{\alpha}$ 的位置。因为Mg-Gd系合金中的 β' 相具有底心正交结构,可以判定选区中的电子衍射斑点符合取向关系 $[\bar{1}010]_{\alpha} // [\bar{1}00]_{\beta'}$, $(0\bar{1}\bar{1}1)_{\alpha} // (020)_{\beta'}$, $(0001)_{\alpha} // (00\bar{1})_{\beta'}$ 。

3.2 热处理对合金腐蚀速率的影响

图4为采用失重法得到的铸态、固溶态和时效态Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金在3.5%NaCl溶液中不同时间的腐蚀速率。铸态,固溶态和时效态合金的

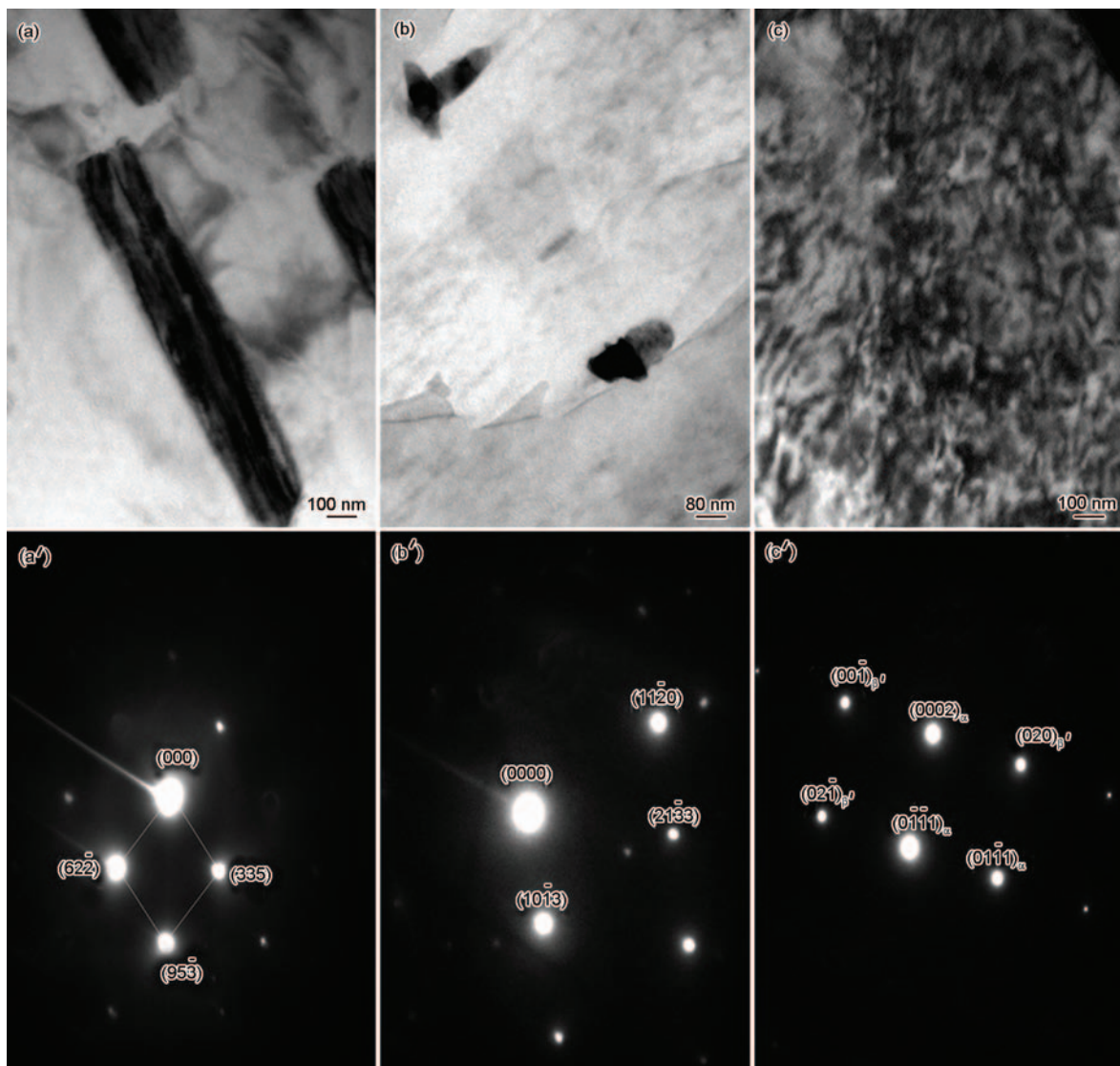


图3 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金热处理前后的TEM像

Fig.3 TEM images of Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy before and after heat treatment: (a, a') as-cast, (b, b') solid solution state, (c, c') aging state

平均腐蚀速率随腐蚀时间的变化趋势基本一致。即在腐蚀前期 (0~48 h), 腐蚀速率不断增大, 且增长较快; 腐蚀中期 (48~72 h), 腐蚀速率呈下降趋势; 腐蚀后期 (72~96 h), 固溶态和时效态合金腐蚀速率略有上升。与铸态 ($0.74 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 相比, 固溶态 ($0.41 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 和时效态 ($0.35 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 合金的平均腐蚀速率明显减小。由此可知, 热处理可以明显提高合金的耐腐蚀性能。

图5为Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金分别在3.5% NaCl溶液中腐蚀48 h后, 用2020万像素数码相机拍摄的合金宏观腐蚀形貌图。3种合金试样表面都出现了蚀坑, 表面或多或少均附着有白色疏松的腐蚀产物。时效态合金整体腐蚀较轻, 表面的腐蚀产物颗粒较少, 只是在某些地方有很小的蚀坑出现。固溶态合金表面的腐蚀程度明显加剧, 不仅出现大量

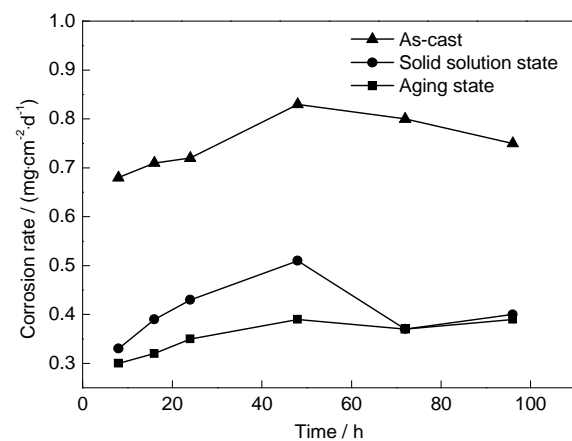


图4 铸态、固溶态和时效态 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金的腐蚀速率随时间的变化曲线

Fig.4 Corrosion rate vs time curves of as-cast, solid solution and aging treated Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy

块状腐蚀产物,而且观察到多处深浅不一的腐蚀坑。铸态合金表面的腐蚀程度急剧增加,合金整体被严重腐蚀,表面完全被白色的腐蚀产物掩盖,腐蚀坑随处可见。

图6为3种不同合金试样分别在3.5% NaCl溶液中腐蚀48 h后的SEM像。在时效态合金表面只有少量颗粒状的腐蚀产物出现,试样表面比较光滑,有零星腐蚀坑存在,合金的腐蚀程度较轻。固溶态合金表面腐蚀产物明显增多变大,块状的腐蚀产物和较深的腐蚀坑分布在合金表面。铸态合金表面腐蚀的更为严重,整个合金表面完全呈坑蚀状态,部分腐蚀坑较深,有纵向发展的趋势。

研究^[18]表明,镁合金的腐蚀行为与其显微组织有着密切的关系,镁合金腐蚀的主要原因是微电偶腐蚀,在形成微电池时,电位低的材料为阳极,而电位高的材料为阴极。当镁合金在3.5%NaCl溶液中

被腐蚀时,由于 Mg^{2+} 与 Cl^- 的结合力大于 Mg^{2+} 与 O^{2-} 的结合力(MgCl_2 键能为 $601.9 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, MgO 键能为 $641.1 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)^[19],形成可溶性的 MgCl_2 ,因此在合金表面形成腐蚀坑,成为坑蚀核。随着腐蚀的不断进行,蚀核不断长大,当达到坑腐蚀的临界电位,则形成蚀坑。此时蚀坑处电位低成为阴极,而外部电位高成为阳极,构成了微电池。铸态合金的组织是由 $\alpha\text{-Mg}$ 基体和粗大共晶 β 相组成,共晶相大小不一,分布不均,致使合金的组织不均匀,在腐蚀过程容易形成微电池,降低合金的耐腐蚀性。固溶态合金、粗大的 β 相几乎已经溶入 $\alpha\text{-Mg}$ 基体,只有少量热稳定性好的未溶相,这样会大大降低微电池产生的机会,有利于合金的耐腐蚀性。时效态合金,析出大量方块状的颗粒 β 相,这些高熔点 β 相热稳定性好,且分布均匀,起到细化晶粒、强化晶界的作用。镁合金的晶界相对于晶内为阴极,易产生沿晶腐蚀,方块状的颗粒

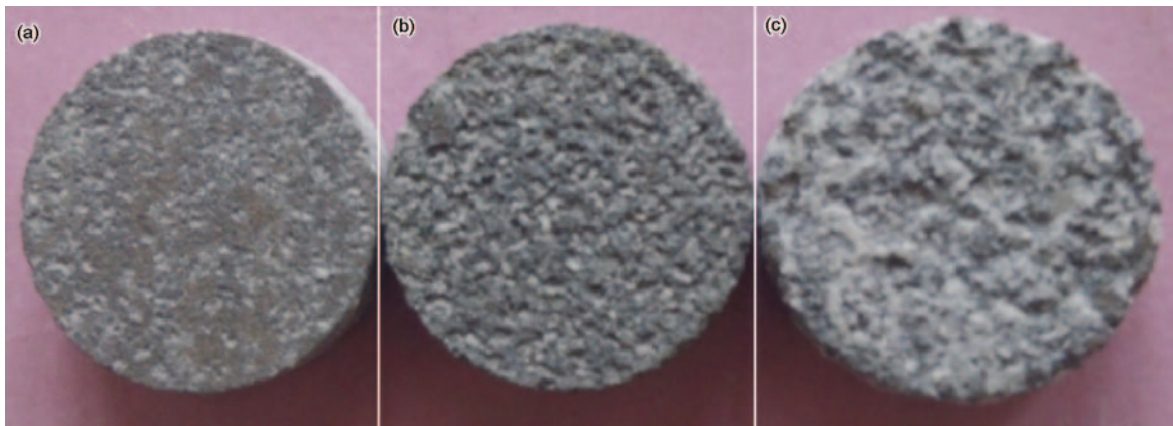


图5 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金腐蚀48 h后的宏观腐蚀形貌

Fig.5 Macroscopical morphologies of Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy after corrosion in 3.5%NaCl solution for 48 h: (a) aging state, (b) solid solution state, (c) as-cast

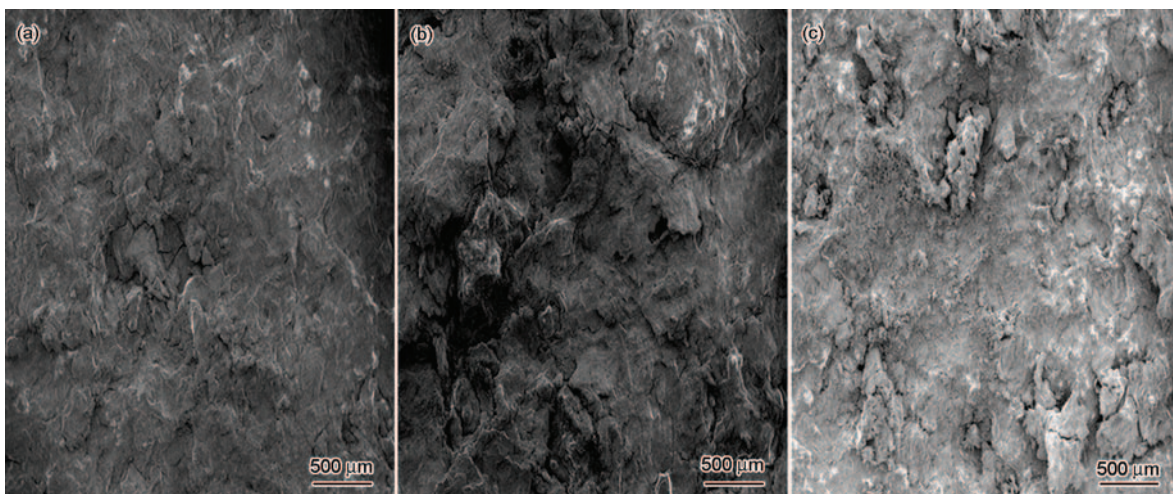


图6 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金腐蚀48 h后的表面形貌

Fig.6 Surface morphologies of Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy after corrosion for 48 h: (a) aging state, (b) solid solution state, (c) as-cast

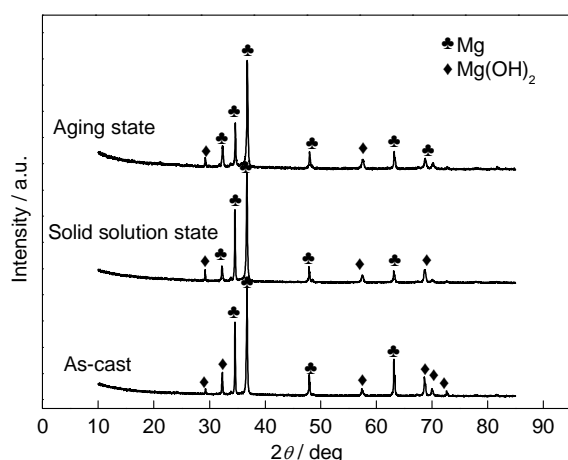


图7 Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金表面腐蚀产物的XRD谱

Fig.7 XRD patterns of the surface corrosion products of Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy

β 相有效地阻止了腐蚀的扩展,腐蚀程度减弱,有效的提高了合金的耐蚀性。

图7为Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金分别在3.5% NaCl溶液中腐蚀48 h后表面腐蚀产物的XRD谱。可见,腐蚀产物由Mg和Mg(OH)₂组成。根据合金中各元素的电极电位差,合金在溶液中主要是 α -Mg基体的腐蚀,Mg₅Gd相,Mg₁₂Nd相及方块相几乎不与溶液反应。 α -Mg基体与溶液反应生成Mg(OH)₂,MgO和MgCl₂。随着腐蚀的进行,腐蚀初期生成的MgO在腐蚀溶液中长时间浸泡,生成了Mg(OH)₂,附着在合金表面,合金内部则相对较少,而MgO的分布正好与之相反。合金在NaCl溶液中生成的MgCl₂可溶,所以腐蚀产物中未见MgCl₂。

整体来看,铸态合金的Mg(OH)₂衍射峰最多,固溶态合金次之,时效态合金最少。另外,由于Mg(OH)₂的热稳定性远远大于MgO的,因此Mg(OH)₂对Mg基体有一定的保护作用,有效的阻止了合金的进一步腐蚀。

4 结论

(1) Mg-10Gd-2.5Nd-0.5Zr合金铸态显微组织为粗大枝状晶,呈断续网状分布;经固溶处理后大部分枝晶溶入 α -Mg基体,只有少量方块状颗粒未溶相;再经过时效处理后,方块状颗粒相有长大趋势,并明显增多,且主要分布在晶界处。

(2) 铸态、固溶态和时效态合金在3.5%NaCl溶液中的腐蚀速率分别为0.74、0.41和0.35 mg·cm⁻²·d⁻¹。固溶和时效态合金由于 β 相析出方式和形貌的改变,耐蚀性能明显提高。

(3) 合金的腐蚀产物以Mg(OH)₂为主。由于Mg(OH)₂的热稳定性远远大于MgO的,因此

Mg(OH)₂对 α -Mg基体有一定的保护作用,有效的阻止了合金的进一步腐蚀。

参考文献

- [1] Fu S L, Li Q A, Jing X T, et al. Effects of heat treatment on microstructure of Mg-12Gd-2Y-0.5Sm-0.5Sb-0.5Zr alloy [J]. Trans. Mater. Heat Treat., 2014, 35(4): 47
(付三玲, 李全安, 井晓天等. 热处理对Mg-12Gd-2Y-0.5Sm-0.5Sb-0.5Zr显微组织的影响 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(4): 47)
- [2] Pang S, Wu G H, Liu W C, et al. Influence of cooling rate on solidification behavior of sand-cast Mg-10Gd-3Y-0.4Zr alloy [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2014, 24: 3413
- [3] Wang Z Q, Zhang B, Li D J, et al. Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of high vacuum die casting Mg-8Gd-3Y-0.4Zr magnesium alloy [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2014, 24: 3762
- [4] Ding W J. Magnesium Science and Technology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 64
(丁文江. 镁合金科学与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 64)
- [5] Cao L, Liu W C, Wu G H, et al. Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of sand-cast Mg-10Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2014, 24: 611
- [6] Zhang Q, Li Q A, Jing X T, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-10Y-1.5Sm alloy [J]. Trans. Mater. Heat Treat., 2011, 32(1): 24
(张清, 李全安, 井晓天等. Mg-10Y-1.5Sm合金的组织 and 力学性能 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(1): 24)
- [7] Wu D, Tang W N, Chen R S, et al. Strength enhancement of Mg-3Gd-1Zn alloy by cold rolling [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2013, 23: 301
- [8] Mao P L, Yu J C, Liu Z, et al. Dynamic mechanical property and failure behavior extruded Mg-Gd-Y alloy under high strain rate compression [J]. Chin. J. Nonferrous Met., 2013, 23(4): 3066
(毛萍莉, 于金程, 刘正等. 挤压态Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr镁合金动态压缩力学性能与失效行为 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 3066)
- [9] Li Q A, Li K J, Zhang Q. Effects of Sm on microstructure and mechanical properties of aged Mg-12Gd-2Y-0.5Zr alloy [J]. Trans. Mater. Heat Treat., 2011, 32(12): 84
(李全安, 李克杰, 张清. Sm对时效Mg-12Gd-2Y-0.5Zr合金组织和力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(12): 84)
- [10] Li L J, Wang S, Pan F S, et al. Corrosion behavior of AM60 magnesium alloys in automobile engine coolants [J]. Electrochemistry, 2010, 49(16): 425
(李凌杰, 王莎, 潘复生等. AM60镁合金在汽车发动机冷却液中的腐蚀电化学行为 [J]. 电化学, 2010, 49(16): 425)
- [11] Huang L, Huang Y W, Wang C, et al. Study on corrosion product film of Mg-Al alloys containing rare earth element in NaCl solution [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2002, 22: 167
(黄亮, 黄元伟, 王晨等. 含稀土元素的Mg-Al合金在NaCl溶液中腐蚀产物膜的研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22: 167)
- [12] Zhou J, Feng Z Y, Zhang J L, et al. Effect of Nd addition on corro-

- sion resistance of AM60 magnesium alloy [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2014, 34: 185
(周京, 冯芝勇, 张金玲等. 稀土 Nd 含量对 AM60 镁合金耐蚀性能的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34: 185)
- [13] Liu Z L, Zhu X C, Zhou G B, et al. Effects of Sb addition on corrosion properties of Mg-5Al-2Sr alloy [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2012, 32: 478
(刘子利, 朱晓春, 周桂斌等. Sb 对 Mg-5Al-2Sr 合金耐腐蚀性能的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32: 478)
- [14] Yi J L, Zhang X M. Effects of Ce on microstructure and corrosion resistance of Mg-9Gd-4Y-1Nd-0.6Zr alloy [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2012, 32: 262
(易建龙, 张新明. Ce 对 Mg-9Gd-4Y-1Nd-0.6Zr 合金微观组织和耐蚀性的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32: 262)
- [15] Wu G H, Fan Y, Zhai C Q, et al. Effect of La on the corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy in NaCl solution [J]. Acta Metall. Sin., 2008, 44(10): 1247
(吴国华, 樊昱, 翟春泉等. 稀土 La 对 AZ91D 镁合金在 NaCl 溶液中耐蚀性的影响 [J]. 金属学报, 2008, 44(10): 1247)
- [16] Zeng R C, Guo X L, Liu C L, et al. Study on corrosion of medical Mg-Ca and Mg-Li-Ca alloys [J]. Acta Metall. Sin., 2011, 47(11): 1477
(曾荣昌, 郭小龙, 刘成龙等. 医用 Mg-Ca 和 Mg-Li-Ca 合金腐蚀研究 [J]. 金属学报, 2011, 47(11): 1477)
- [17] Zhang Y C, Wang J C, Lv W Q. Corrosion behavior of Mg-Zn-Y-Zr alloys in NaCl solution [J]. Acta Metall. Sin., 2011, 47(9): 1174
(张亚丛, 王锦程, 吕文泉. Mg-Zn-Y-Zr 合金在 NaCl 溶液中的腐蚀行为 [J]. 金属学报, 2011, 47(9): 1174)
- [18] Zhang J L, Liu Y L, Zhou J, et al. Influence of T6 treatment on corrosion resistance of Mg-9Al-Zn-0.16La alloy [J]. Trans. Mater. Heat Treat., 2014, 35(5): 64
(张金玲, 刘阳力, 周京等. T6 处理对 Mg-9Al-Zn-0.16La 合金耐蚀性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 64)
- [19] Li K J, Li Q A. Effects of addition of Sm and Sb on microstructure and mechanical properties of aged Mg-12Gd-2Y-0.5Zr alloy [J]. Trans. Mater. Heat Treat., 2011, 32(5): 110
(李克杰, 李全安. Sm 和 Sb 对时效态 Mg-12Gd-2Y-0.5Zr 合金组织与力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(5): 110)